2Ш

**УДК 681.31**

***Б.М. Шевчук***
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, м. Київ, Україна
incors@ukr.net

# Математичні оцінки та обґрунтування показників і параметрів високоінформативних комп'ютерних мереж

На основі розробленої методології побудови високоінформативних комп'ютерних мереж запропоновані показники та параметри таких мереж, які є інформаційними показниками і дозволяють організувати оперативну оцінку і корекцію ефективності передачі даних при наявності значних змін співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку, яке часто буває значно меншим за одиницю. Дані показники можуть бути використані при порівнянні роботи високоінформативних мереж передачі даних.

## Вступ

Дослідження поведінки об'єктів різноманітної природи, включаючи об'єкти наукових досліджень живої і неживої природи, об'єкти промисловості, транспорту, сільського господарства, навколишнього середовища, біооб'єкти, вимагають вирішення комплексу проблем, пов'язаних зі збором (введенням), обробкою і передачею інформації. Такі проблеми включають обробку і передачу вимірювальних сигналів, статичних зображень, відеоданих, різноманітних масивів двійкових послідовностей. У процесі побудови та організації функціонування комп'ютеризованих пристроїв, систем і мереж однією з базових операцій є реалізація ефективної передачі даних між об'єктними пристроями комп'ютерних систем і мереж. Визначальною організація передачі інформації проявляється в розподілених на певній території системах і мережах, які практично перетворюються на комп'ютерні мережі передачі інформації.

Дослідження проблем підвищення ефективності передачі інформації в мережах описані в [1-6]. Проте поняття «ефективна» («високоефективна») передача інформації є достатньо відносною і неповною характеристикою роботи мереж передачі даних [5]. При побудові технічних систем їх розробники як правило керуються принципом мінімальних витрат, який ґрунтується на врахуванні комплексу технічних і економічних показників. Тому часто із-за економічної доцільності кращою вважається система, яка в процесі розробки і експлуатації вимагає найменших витрат при досягненні заданих технічних ефектів. При створенні нових і перспективних систем та порівнянні їх характеристик з існуючими системами актуальною проблемою є розробка показників оцінки ефективності роботи системи передачі інформації за технічними, і в першу чергу, інформаційними показниками. Тому **метою статті** є розробка нових інформаційних показників, які забезпечують оперативну оцінку та корекцію ефективності передачі даних при наявності значних змін співвідношення сигнал/шум в каналі зв'язку, яке часто буває значно меншим за одиницю. Такі ситуації виникають при експлуатації космічних систем передачі інформації, мікростільникових мереж передачі даних та різноманітних систем зв'язку з ненаправленими антенами. Дані показники з успіхом можуть бути використані при порівнянні роботи високоефективних мереж передачі даних, які в статті отримали назву «високоінформативні» комп'ютерні мережі.

# Методологічні основи побудови високоінформативних комп'ютерних мереж

Мережі передачі даних характеризуються швидкістю передачі інформації при забезпеченні заданої достовірності передачі елементарних сигналів, наприклад, бітових канальних сигналів. При цьому швидкість передачі інформації $R$ (біт/с) при заданій робочій смузі частот суттєво залежить від поточного співвідношення сигнал/шум в точці прийому, тобто при зменшенні величини сигнал/шум достовірність передачі інформації спадає, що призводить до появи помилок при передачі даних. Тому необхідно підтримувати задане співвідношення сигнал/шум в точці прийому інформації за рахунок підвищення потужності передавача та шляхом збільшення тривалості елементарних сигналів, тобто за рахунок зменшення величини $R$. Тому в мережах передачі даних існує відповідний взаємозв'язок між основними ресурсами каналу зв'язку: пропускною здатністю каналу (швидкістю передачі інформації), потужністю сигналу і робочою смугою частот. Для досягнення ефективної передачі інформації необхідно [6], щоб фактична швидкість передачі інформації (реальна пропускна здатність каналу зв'язку) була як можна ближче до граничної, а дані, що передаються, повинні бути такими, щоб реальна пропускна здатність каналу використовувалась найбільш ефективно.

Тому високоінформативні комп'ютерні мережі (ВіКМ), включаючи радіомережі, характеризуються оптимальним вирішенням комплексу проблем в місцях виникнення інформаційних потоків, тобто на об'єктах, з урахуванням мінімізації сумарного трафіку достовірних даних в спільному ресурсі ВіКМ – мережі передачі даних, при умові відновлення первинних даних моніторингу (сигналів і зображень) з заданою точністю. Оскільки масиви даних розбиваються на пакети даних відповідної довжини (часто змінної), які передаються по каналу зв'язку, в режимі зі зворотнім зв'язком (абонент-відправник інформації реалізує процедуру доступу до спільного ресурсу – каналу зв'язку, і після успішної реалізації процедури доступу передає абоненту-адресату поточний пакет інформації; абонент-адресат, після успішного прийому пакету, передає абоненту-відправнику пакет-квитанцію, в якому підтверджує факт прийому пакету), то передача даних малими порціями здійснюється найбільш ефективно і з максимальною достовірністю.

Мінімізація інформаційних потоків у ВіКМ досягається за рахунок [7], [8] виявлення інформативних та достовірних даних моніторингу на етапі введення вхідних даних від об'єктів засобами об'єктних (абонентських) систем ВіКМ. На основі отриманих даних про якість введеної інформації забезпечуються умови для оптимізації процесів фільтрації і компактного кодування вхідних даних, експрес-аналізу сигналів, зображень та станів об'єктів, що в кінцевому рахунку дозволяє мінімізувати інформаційні потоки в місцях їх зародження. Для кожної об'єктної (абонентської) системи ВіКМ це приводить до зменшення кількості переданих пакетів та їх тривалості. Тому ефективність функціонування ВіКМ суттєво залежить від оптимізації вирішення проблем введення, обробки, кодування, формування та передачі пакетів даних кожним абонентом мережі з використанням високопродуктивних сигнальних процесорів, процесорних модулів, програмуючих логічних схем і мікроконтролерів. В свою чергу кожна об'єктна (абонентська) система повинна характеризуватись високою інформативністю при виконанні складових операцій багатофункціональної обробки і кодування даних, в результаті чого в канал зв'язку відправляються оптимізовані за тривалістю криптостійкі та завадостійкі пакети даних зі

швидкістю передачі, яка узгоджена з показником сигнал/шум в точці прийому пакету інформації. Підвищення інформативності об'єктних (абонентських) систем ВіКМ безпосередньо пов'язане з підвищенням достовірності, компактності і захищеності даних (від несанкціонованого доступу до даних і їх підміни та від спотворень елементарних сигналів, що передаються в канал зв'язку з шумами). Відповідно узагальнений алгоритм функціонування абонентів ВіКМ має вигляд:

$$ОДіК \begin{matrix} \Rightarrow O_{вд} \Rightarrow O_{фд} \Rightarrow O_{сд} \Rightarrow O_{зд} \Rightarrow O_{фіп} \Rightarrow O_{дкз} \Rightarrow O_{ПерІП} \\ \Leftarrow O_{фкс} \Leftarrow O_{ді} \Leftarrow O_{ПрІП} \end{matrix},$$

де ОДіК – об'єкт дослідження і керування; при передачі даних – $O_{вд}$, $O_{фд}$, $O_{сд}$, $O_{зд}$, $O_{зкд}$, $O_{фіп}$, $O_{дкз}$, $O_{ПерІП}$, відповідно оператори введення даних, фільтрації даних, стиску даних, завадостійкого кодування даних, формування інформаційних пакетів, доступу до каналу зв'язку, передачі інформаційних пакетів; при прийомі даних – $O_{ПрІП}$ ,$O_{ді}$, $O_{ПрІП}$, відповідно оператори прийому інформаційних пакетів, декодування інформації, формування сигналів керування.

Охарактеризуємо ключові операції багатофункціональної обробки, кодування та передачі даних на об'єктах, які забезпечують високу інформативність об'єктних пристроїв та систем. При введенні даних від об'єктів доцільно опосередковано визначати вхідне співвідношення сигнал/шум і в залежності від його величини оптимізувати обробку даних [7], [8]. З метою оперативної фільтрації-стиску сигналів і зображень без залучення потужних спеціалізованих процесорів і кодеків доцільно на згладженій огинаючій сигналів (відеосигналів) визначати суттєві відліки (СВ), до яких відносяться екстремуми і точки перегину. Подальша обробка даних ґрунтується на обчисленні показників інформативності *i*-го СВ та упорядкування отриманих показників за величиною їх рейтингу. Це дозволить організувати більш компактне кодування масивів вибірок сигналів та статичних зображень, а також послідовностей кадрів відеоданих. При цьому послідовності СВ (екстремумів) з меншим рейтингом показників інформативності апроксимуються лінійними кривими на ділянках з низьким показником вхідного співвідношення сигнал/шум. Прикладом найпростішої (швидко обчислювальної) характеристики інформативності *i*-го СВ є індикативна функція вигляду

$$I_i^{CB} = \begin{cases} 00, X_i/2 \le \Delta X_i \le X_i, \\ 01, X_i/4 \le \Delta X_i \le X_i/2, \\ 10, X_i/8 \le \Delta X_i \le X_i/4, \\ 11, X_i/16 \le \Delta X_i \le X_i/8, \end{cases}$$

де $I_i^{CB}$ – показник інформативності СВ, $\Delta X_i = X_i^{CB} - X_{i-1}^{CB}$ – різниця між $i$-$м$ і $(i-1)$-$м$ СВ, $X_i$ – амплітудне значення *i*-го СВ.

Визначення більш складних показників інформативності СВ ґрунтується на обчисленні відносних величин при аналізі амплітудних значень ($i$ –1)-го, *i*-го та ($i$+1)-го СВ.

Подальше компактне кодування СВ вибірок сигналів і зображень при заданій якості відновлення форми огинаючої кривої досягається за рахунок зменшення динамічного діапазону амплітудних значень СВ, наприклад, шляхом логарифмування відліків СВ. Отримані масиви даних підлягають стиску без втрат та захисту на основі гаміювання з довготривалими псевдовипадковими послідовностями, які від пакету

до пакету є змінними [8]. Для захисту даних від підміни біти завадостійкого кодування випадковим чином маскуються в масивах даних пакетів інформації. Слід зазначити, що хороший алгоритм криптозахисту інформації утворює шифровані дані з практично рівномірним розподілом $q$ – бітових символів, де $q$ – кількість біт символу. Величина ступеня захисту інформації $P_z$ пропорційна величині масиву даних інформаційного кадру пакету, що підлягає шифруванню, і на практиці цю величину можна орієнтовно визначити виразом

$$P_z = \max\left[2^{N_p \cdot L_{IK}}\right] \geq 2^{1024},$$

де $N_p$ – кількість інформаційних кадрів, біти яких підлягають перемішуванню, $L_{IK}$ – довжина (тривалість) інформаційного кадру.

При формуванні інформаційних пакетів для зменшення їх тривалості, що еквівалентно додатковому стиску даних без втрат в каналі зв’язку, доцільно відповідні бітові послідовності пакетів інформації перетворювати в інтервально-імпульсні сигнали, які можуть передаватись шумоподібними або над широкосмуговими сигналами, бази яких вибираються адаптивно в залежності від опосередковано визначеного поточного співвідношення сигнал/шум в каналі зв’язку. Слід зазначити, що коефіцієнт стиску даних $k_{LIП}$, який визначається як відношення тривалості пакетів інформації до і після кодування даних, наприклад, з рівномірним розподілом двійкових послідовностей, в середньому досягає величин $k_{LIП} \geq 1{,}6 - 2$. Основою такого кодування є використання нерівномірного коду, тобто короткі інтервали використовуються для передачі більш частіших послідовностей бітів, а більш тривалі – для менш частіших. Використання нерівномірного коду дозволяє понизити збитковість, яка викликана нерівною ймовірністю появи відповідних послідовностей бітів, а перехід від кодування окремих бітів до кодування відповідних двійкових послідовностей понижує збитковість, яка викликана залежністю між послідовностями бітів.

# Показники та параметри ВіКМ

Ефективність функціонування мереж передачі інформації характеризується якісними показниками, основними із яких є точність передачі інформації і швидкість передачі інформації [5]. Перша характеристика визначає якість передачі інформації, а друга – кількість. Якість передачі інформації в значній мірі визначається її завадостійкістю, яка в свою чергу вимагає ускладнення методів кодування/декодування даних та пониження швидкості $R$. Часто для оцінки ефективності передачі даних використовують коефіцієнти [1], [4], [5]

$$\beta_E = E_0 / N_0, \quad \beta = R / \rho_0, \; \gamma = R / F,$$

де $E_0$ – енергія сигналу на вході приймача, яка витрачається на передачу одного біта інформації, $N_0$ – спектральна густина потужності шуму на вході приймача (енергетичний спектр завад), $R$ – швидкість передачі інформації, $\rho_0$ – відношення потужності сигналу $P_c$ до спектральної густини $N_0$ потужності шуму, $F$ – ширина смуги частот, яку займає канал зв’язку і яка відповідає ширині спектра канальних сигналів.

Дані коефіцієнти характеризують енергетичну та частотну ефективність системи передачі інформації та розглядаються як показники роботи системи зв’язку, яка оцінюється у відповідності з критеріями питомих витрат.

Загальною характеристикою ефективності роботи систем передачі інформації є коефіцієнт використання каналу зв'язку за пропускною здатністю, який відповідає інформаційній ефективності системи зв'язку [5]

$$\eta = R/C,$$

де $R = k/T_b = (1/T_b)\cdot\log_2 D$ (біт/с), де $k$-біт відповідають символу із $D = 2^k$ – символьного алфавіту, $T_b$ – тривалість $k$-бітового символу [1], [5], $C = F\cdot\log(1+\rho)$, $\rho = P_c/P_ш$ – відношення потужності сигналу і шуму в смузі $F$.

В реальних системах передачі інформації $\eta < 1$ і при передачі двійкових послідовностей максимальна канальна швидкість передачі інформації $v_{к\max} = 1/T_b$ (біт/с), де $T_b$ – тривалість бітового символу, при цьому мінімальна смуга частот каналу зв'язку $F = v_к/2$ [1], а ефективність використання смуги частот $\xi = v_к/F = 2$ біт/с/Гц. Реальна пропускна здатність цифрових систем передачі інформації понижується з ідеальних 2 символів/с/Гц до 1,8 – 1,4 символів/с/Гц [1], що пов'язано з виникненням міжсимвольної інтерференції під час передачі цифрових сигналів по каналу зв'язку (радіоканалу). Тому для суттєвого зменшення похибок при прийнятті рішення про прийом відповідного символу необхідно збільшувати ширину смуги каналу зв'язку з урахуванням заданої якості відновлення крутизни фронту імпульсних сигналів, тобто

$$F = k_{сф}\cdot v_к/2,$$

де $k_{фс} = (F + F_0)/F_0$ – коефіцієнт, що враховує якість відновлення фронтів цифрових сигналів, $F_0$ – надлишкова смуга частот.

На сьогоднішній день не існує єдиного визначення ширини смуги частот радіоканалу. Основним критерієм визначення величини $F$ пов'язано з вмістом в смузі частот певної частини сумарної потужності сигналу. Для надійної передачі інформації при заданій смузі частот $F$ каналу зв'язку швидкість $v_к$ необхідно зменшувати на величину $k_{фс}$, тобто $v_к = 2F/k_{фс}$. Підвищення швидкості $v_к$ при обмеженій смузі частот досягається за рахунок збільшення кількості елементів сигналу, що передається несучою. Альтернативним і перспективним способом передачі інформації є передача даних без несучої [1], [3]. До найбільш поширених способів підвищення інформаційної швидкості передачі інформації $v_i$ ($v_i = k\cdot v_к, k > 1$) відносяться: кодування джерела інформації (стиск даних без втрат); багаторівнева маніпуляція параметрів канальних сигналів; організація передачі даних по незалежним моноканалам (частотним, кодовим, просторовим). Кожна схема маніпуляції вимагає використання необхідної (зайнятої) ширини смуги радіочастот $F_з = k_{фс}\cdot k_m\cdot v_к/2$, де $k_m > 1$ – коефіцієнт, що враховує метод маніпуляції несучої. Враховуючи попередній стиск даних, максимальна інформаційна швидкість передачі інформації визначається виразом

$$v_{i\max} = v_к\cdot m_m\cdot K_{ст} = \frac{2F\cdot m_m\cdot K_{ст}}{k_{фс}\cdot k_m},$$

де $m_m$ – кількість біт, що передаються при реалізації маніпуляції даних, $K_{ст} = k_{св}\cdot k_{сбв}\cdot k_{LП}$ – коефіцієнт стиску даних, де $k_{св}$ – коефіцієнт стиску даних з втратами (що характерно при обробці сигналів і зображень), $k_{сбв}$ – коефіцієнт стиску даних без втрат, $k_{LП}$ – коефіцієнт зменшення тривалості пакету інформації.

При збільшенні швидкості передачі інформації тривалість бітів зменшується, тому при значному рівні шумів в точці прийому спостерігається більша кількість спотворених (не правильно прийнятих) бітів. Практика показала, що для поточної оцінки продуктив-

ності цифрових систем зв'язку та характеристики швидкості передачі інформації і рівня помилок більш доцільно контролювати величину $E_b / N_0$, яка є відношенням енергії сигналу на один біт (питомої енергії одного біту) до густини потужності шумів на один герц (спектральної густини потужності шуму) [1], [2], де $E_b = P_c \cdot T_b$, $N_0 = P_ш / F$. Перевагою використання величини $E_b / N_0$ для характеристики системи зв'язку в порівнянні з відношенням $\rho = P_c / P_ш$ є незалежність показника $E_b / N_0$ від ширини смуги $F$. Тому основою для підтримки максимальної канальної швидкості передачі $v_{к\max}$, відповідно і величини $v_{i\max}$, є дотримання необхідного значення відношення енергії біта даних до спектральної густини потужності шумів $(E_b / J_0)_н$, де $J_0 = J / F >> N_0$, $J$ – середня потужність сумарних завад (теплового шуму і широкосмугового гаусового шуму, утвореного від роботи сусідніх передавачів, джерел промислових та імпульсних завад). Враховуючи, що $v_{к\max} = 1/T_b$, можна записати такий вираз

$$(E_b / J_0)_н = \frac{P_c \cdot T_b}{J / F} = \frac{P_c}{J} \cdot \frac{F}{v_к},$$

де $F / v_к = F \cdot T_b = B -$ коефіцієнт розширення спектра сигналу або база сигналу.

Таким чином для збереження необхідного значення $E_b / N_0$ при підвищенні швидкості передачі даних $v_{к\max}$ необхідне збільшення потужності сигналу по відношенню до потужності шумів. При незмінній потужності сигналу і шуму збільшення величини $v_{к\max}$ призводить до збільшення рівня виникнення помилок. Оскільки реальні канали радіозв'язку мають обмежену смугу $F$, в якій рівень шумів змінюється у великих межах, то забезпечення передачі інформації з заданим рівнем помилок досягається за рахунок зміни параметрів бази сигналу $B$ у великих межах. Використання шумоподібних сигналів (ШПС) з $B >> 1$ дозволяє підвищити завадостійкість систем зв'язку, а наявність в каналі зв'язку складної структури ШПС в частотно-часовій області унеможливлює прийом сигналів сторонніми абонентами. Для підвищення інформаційної швидкості передачі інформації при великих базах ШПС доцільно організувати одночасну передачу даних по $L$ кодовим (ортогональним) моноканалам в спільному спектрі частот, де $L \le B/4$. Подальшою перспективою розвитку пакетних радіомереж є використання надширокосмугових сигналів (НШСС) [1], [3]. На відміну від «класичних» систем передачі інформації з ШПС робоча смуга частот в системах з НШСС зворотно пропорційна тривалості імпульсів, які є носієм інформації. На відміну від систем зв'язку з ШПС, які мають спектр типу $\sin x / x$, спектри систем з НШСС практично мають рівномірний спектр в широкій смузі частот, що дозволяє побудувати систему передачі інформації з малою густиною потужності на одиницю смуги частот (Вт/Гц). Такі системи зв'язку не створюють суттєвих завад іншим системам і службам, які працюють в тій же смузі частот. Використання імпульсних сигналів малої тривалості ($\tau < 10нс$) для передачі інформації дозволяє реалізувати системи зв'язку з малою ймовірністю виявлення їх функціонування, що суттєво підвищує крипостійкість і завадостійкість. Радіотехнічна апаратура таких систем відносно проста за конструкцією, малогабаритна і реалізується виключно на цифровій елементній базі.

Дослідження поведінки вихідного сигналу $G(j)$ кореляційного приймача ШПС [8] при різних рівнях шумів у каналу зв'язку показали, що база ШПС розподіляється на складові $B = П_ш + M + H$, де $П_ш \approx 0,5B -$ поріг розпізнавання корисного сигналу від шумових складових каналу зв'язку; $M \le B/2 -$ оцінка допустимого рівня шумів у каналі

зв'язку; $H \geq 2$ – величина, яка характеризує якість прийому інформаційного символу. Відповідно, організувавши пакетну передачу даних зі зворотнім зв'язком, пара абонентів, які захопили моноканал, в процесі передачі даних здійснює контроль величини $H$, яка повинна наближатись до величини $H = 2$. Дана умова забезпечує досягнення завадостійкої та криптостійкої передачі даних в шумах радіоканалу. При автоматичному виборі малих величин $B$, що характерно для чистого від шумів каналу зв'язку, доцільно організувати передачу пакетів, при якій $v_i > v_к$. Для цього масиви даних інформаційних пакетів розбиваються на $p_j$ двійкові послідовності, які передаються інтервальними імпульсними сигналами відповідної полярності та тривалості.

# Висновки

Організація дистанційних досліджень поведінки об'єктів різного призначення ґрунтується на використанні об'єктних мережевих пристроїв і систем, які повинні характеризуватись високою інформативністю. Аналіз показників забезпечення ефективної передачі інформації в комп'ютерних мережах показав, що для досягнення високої швидкості та надійності передачі даних необхідно адаптивно змінювати базу сигналу та контролювати якість прийому сигналу абонентськими засобами приймачів ШПС. Запропонована технологія побудови високоінформативних комп'ютерних мереж орієнтована на використання в промисловості, побуті, в телемедицині, спортивній медицині, при вирішенні проблем відеомоніторингу, екомоніторингу та доступу великої кількості абонентів до ресурсів мережі Інтернет та супутникових мереж.

# Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Столлингс В. Передача данных. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 750 с.
3. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
4. Радиосистемы передачи информации: Учебное пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин и др. / Под ред. И.Б. Федорова и В.В. Калмыкова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 472 с.
5. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
6. Цифровые методы в космической связи / Под ред. С. Голомба. – М.: Связь, 1969. – 271 с.
7. Шевчук Б.М., Зінченко В.П. Оперативна багатофункціональна обробка та передача інформації в моніторингових мережах з використанням мікросупутників // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2006. – № 6. – С. 30-36.
8. Шевчук Б.М., Задірака В.К., Фраєр С.В. Ефективні методи фільтрації-стиску та захисту інформації в комп'ютерних мережах тривалого моніторингу станів об'єктів // Штучний інтелект. – 2006. – № 3. – С. 804-815.

***Б.М. Шевчук***

**Математические оценки и обоснования показателей и параметров высокоинформативных компьютерных сетей**

На основе разработанной методологии построения высокоинформативных компьютерных сетей предложены показатели и параметры таких сетей, которые являются информационными показателями и позволяют организовать оперативную оценку и коррекцию эффективности передачи данных при наличии значительных изменений соотношения сигнал/шум в канале связи, которое часто бывает значительно меньше единицы. Данные показатели могут быть использованны при сравнении работы высокоинформативных сетей передачи данных.

*Стаття надійшла до редакції 17.07.2008.*